

# Отчет по лабораторной работе Двигатель Стирлинга

Мамнгов Владислав

Группа БФ3201

17 апреля 2022 г.

# Содержание

<b>Оборудование</b>	<b>3</b>
<b>Теория</b>	<b>3</b>
Механика . . . . .	3
Электромагнетизм . . . . .	4
Термодинамика . . . . .	5
<b>Ход работы</b>	<b>6</b>
Первый способ . . . . .	6
Второй способ . . . . .	8
0 способ . . . . .	10
<b>Вывод</b>	<b>11</b>

# Оборудование

Модель двигателя Стирлинга со спиртовкой в качестве нагревателя, термopара, цифровой мультиметр, электронный дифференциальный датчик давления мембранного типа, цифровой осциллограф, образцовый манометр.

## Теория

### Механика

Процесс зависит только от изменения объема, и не зависит от начального объема рабочего цилиндра.

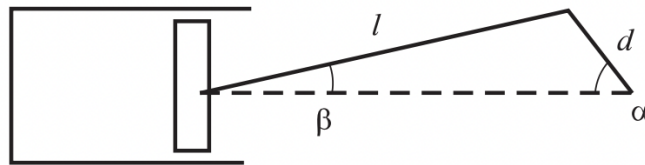


Рис. 1: Схема кинематики поршней

$$\dot{\alpha} = w = \text{const}$$

$$\mathbf{d} + \mathbf{l} = \mathbf{x}$$

$$\begin{cases} d\cos(\alpha) + l\cos(\beta) = x \\ d\sin(\alpha) = l\sin(\beta) \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = d\cos(\alpha) + l\sqrt{1 - \left(\frac{d}{l}\right)^2 \sin^2(\alpha)} \\ \cos(\beta) = \sqrt{1 - \left(\frac{d}{l}\right)^2 \sin^2(\alpha)} \end{cases}$$

$$x(t) = d\cos(wt) + l\sqrt{1 - \left(\frac{d}{l}\right)^2 \sin^2(wt)} + x(0)$$

# Электромагнетизм

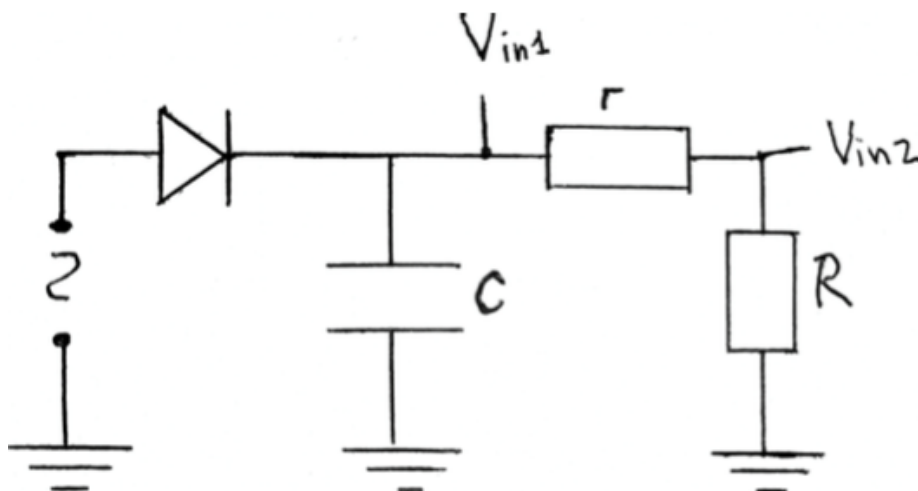


Рис. 2: Схема измерительной цепи

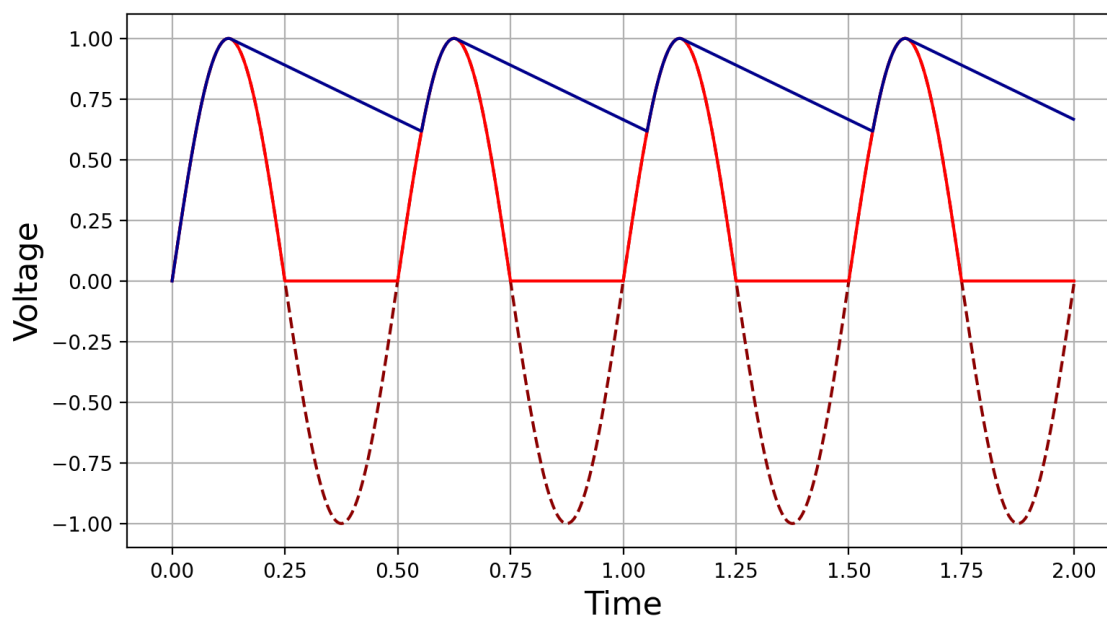


Рис. 3: Сигнал после выпрямителя

$$N = \frac{V_2}{R} V_1$$

При правильном подборе емкости конденсатора, сигнал хорошо выпрямляется (период синусоиды больше  $\tau$  конденсатора)

# Термодинамика

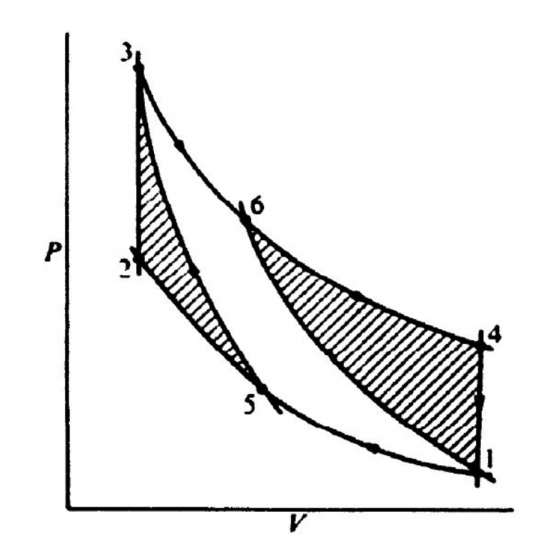


Рис. 4: P(V) диаграмма одного цикла работы двигателя стирлинга

$$\nu = \frac{A}{Q}$$

Уравнение кривой 3-4:

$$P = \nu R T_{\text{H}} \frac{1}{V}$$

Уравнение кривой 1-2:

$$P = \nu R T_{\text{x}} \frac{1}{V}$$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P_{3-4}(V) dV - \int_{V_2}^{V_1} P_{1-2}(V) dV = \nu R \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) (T_{\text{H}} - T_{\text{x}})$$

$$Q_{+} = Q_{3-4} = A_{3-4} = \nu R \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) T_{\text{H}}$$

$$\nu = 1 - \frac{T_{\text{H}}}{T_{\text{x}}}$$

$$N = \lambda \frac{dm}{dt}$$

## Ход работы

В работе рассматривается двигатель Стирлинга  $\gamma$  - типа. Полезная работа двигателя будет сниматься с электродвигателя электрическим сигналом, проходить через условный выпрямитель сигнала, рассеиваться на резисторах и фиксироваться осциллографом. КПД, полученное через вычисление работы из характеристик сигнала будет произведением КПД двигателя Стирлинга и электродвигателя.

### Первый способ

Будем измерять полезную работу по формуле  $N = \frac{V_2}{R} V_1$ ; для этого соберем схему на рисунке 2.

Известно, что мощность и КПД выделяемые на резисторах зависят от соотношения внутреннего сопротивления электродвигателя и сопротивления нагрузки. Для определенности, найдем точку максимальной выделяемой мощности (КПД идеального электродвигателя в этой точке равно 50%). Для этого включим режим умножения каналов на осциллографе, и, изменяя нагрузку переменного сопротивления, добьемся максимума  $V_1 V_2$ . Далее отсоединим из схемы реостат, и измерим значение его сопротивления мультиметром. Это и будет внутреннее сопротивление Электродвигателя при данном режиме работы.

$$R_d = 130 \text{ Ом}$$

Заметим, что если подключить омметр напрямую к стоячему двигателю, значение будет отличаться, и будет порядка 103 Ом. Связано это с нагревом электродвигателя при работе и другими внутренними зависимостями. Величина же  $R_d$  более точно описывает двигатель в данном режиме.

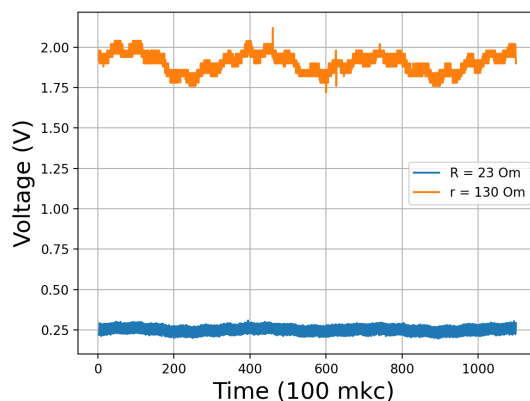


Рис. 5:  $V(T)$ , для двух каналов

Тогда мощность:

$$N \approx \frac{1,9 \cdot 0,25}{12} = 0,040 \pm 0,002 \text{Вт}$$

Затраченную работу, посчитаем как теплоту сгорания спирта за единицу времени. Для этого поставим спиртовку на весы, дождемся установления равномерного горения и замерим, какая масса спирта сгорит за продолжительной промежуток времени равномерного горения. Эксперимент достаточно точный, не зависит от прямоты рук, и его относительная погрешность уменьшается пропорционально времени эксперимента. получили:

$$const = \frac{dm}{dt} = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{11,78 - 11,70}{60} = 1,33 \cdot 10^{-3} \pm 0,08 \frac{\text{г}}{\text{сек}}$$

$$P = \lambda \frac{dm}{dt} = 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot 2,7 \cdot 10^4 = 35 \pm 1 \text{Вт}$$

$$\nu = \frac{2N}{P} = 0,12\%$$

Вклад в данное значение положен еще и за счет преобразования механической энергии в электрический сигнал.

## Второй способ

Подключим к рабочему объему двигателя датчик давления. Воспользовавшись формулой зависимости объема рабочего тела от времени, восстановим прямую зависимость из параметрической. Для этого нужно откалибровать датчик давления, получив зависимость напряжения выхода в зависимости от входящего давления:

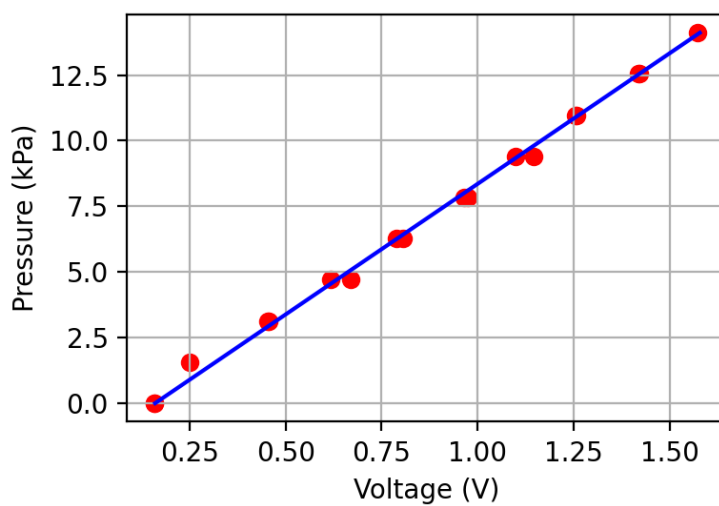


Рис. 6:  $P(U) = 9.94\left(\frac{\text{kPa}}{\text{Volt}}\right) \cdot U - 1,59(\text{kPa})$

Видно, что зависимость можно хорошо экстраполируется прямой.

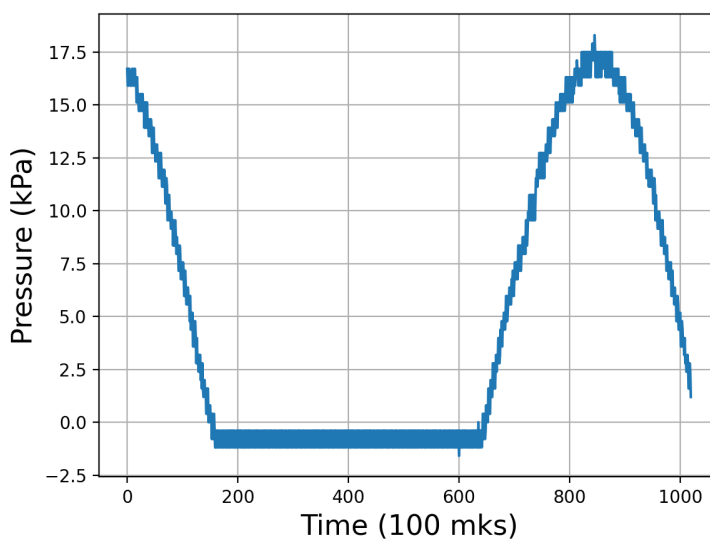


Рис. 7:  $P(T)$



Датчик может измерять только положительное отклонение от внешнего. Для восстановления полной картины, попробуем предположить и восстановить зависимость давления в отрицательной части графика. Видно, что график хорошо повторяет график синуса:

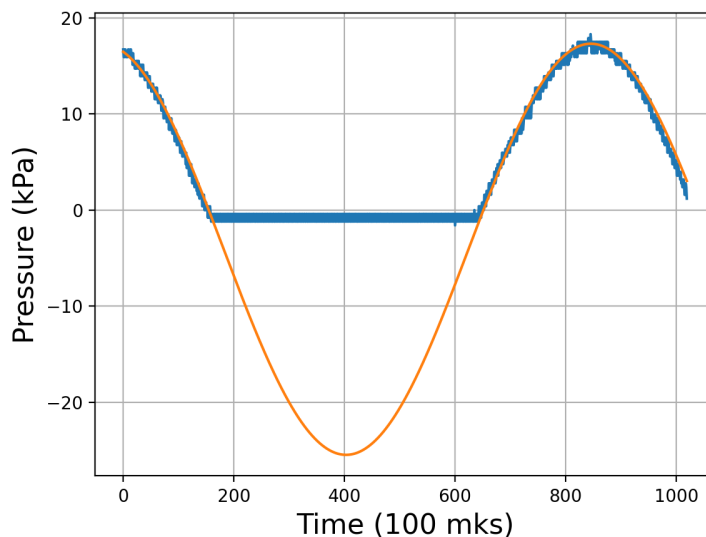


Рис. 8:  $P(T)$ ,  $\sin(at+b)$

Предположим, что график симметричен относительно  $y = y_{avg}$ . Тогда отразим данные, чтобы те повторяли синус, предварительно убрав шум вокруг нуля и прибавим к данным 100 кПа:

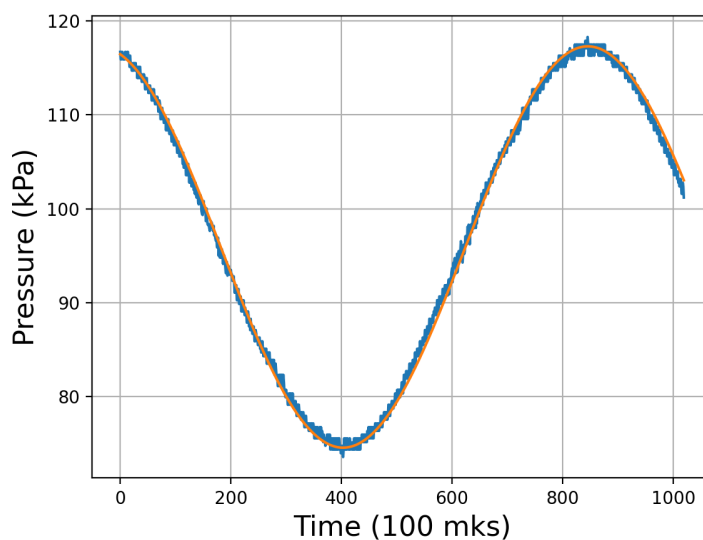


Рис. 9:  $P(T)$  восстановленная

Данные хорошо подгоняются синусоидой. Вычислим среднеквадратическое отклонение:  $\sigma = 0,08$ , что для величин порядка 100 говорит об очень точном результате подгонки.

Для параметров  $d = 7, l = 48$  мм запишем массив  $V(t)$ , фазу восстановим из показаний оптического датчика. Построим  $PV$  диаграмму:

Цифрами обозначены фазы выделенных точек на графике. Заметим, что пример-

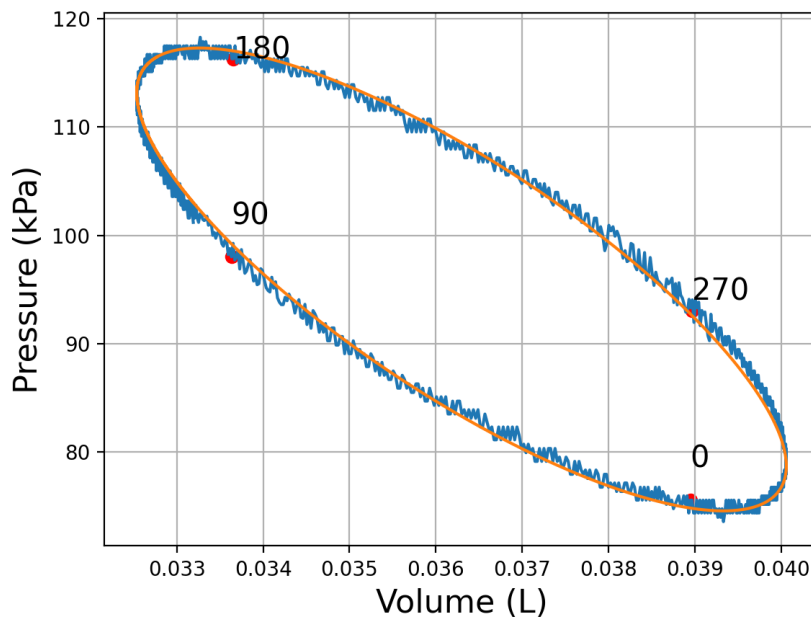


Рис. 10: PV диаграмма

ная точка минимума удаления от фокуса (апоцентр эллипса) имеет на самом деле фазу не 180 градусов, а около 157. Посчитаем работу как площадь под графиком:

$$A = 0,14 \text{ Дж}$$

$$\nu = \frac{0.14}{35 \cdot \tau} = \frac{0.14}{35 \cdot 0,0884} = 4,5\%$$

$$\nu = \frac{S_{in}}{S_{all}} = \frac{0.147}{0.796} = 19\%$$

## 0 способ

Рассчитаем КПД замерив температуры холодильника и нагревателя, подключив к ним термопару:  $T_n = 753K, T_x = 315K$

$$\nu = 1 - \frac{315}{753} = 58\%$$

## Вывод

Идеализированная модель двигателя Стирлинга, работает по циклу из двух изотерм и двух изохор. Реально же поршень, совершающий полезную работу, приводящийся в движение компрессионным объемом, имеет инерцию, и двигатель не сможет совершать изохорическое охлаждение и нагревание, вместо этого движение поршня происходит с примерно постоянной угловой скоростью. Это дает свой вклад в расхождение реального КПД от теоретического. Так же, не все сгорающее тепло поступает телу, часть рассеивается в окружающую среду. Коэффициент поглощения тепла можно оценить снизу, зная теоретическое КПД и реально вычисленное вторым способом:

$$\alpha = \frac{\nu_2}{\nu_0} = 33\%$$

Реальное же значение будет больше.

Более точно из полученных результатов можно оценить потери энергии, при передаче ее до резисторов. Это будет отношением КПД полученных первым и вторым способом:

$$\beta = \frac{\nu_1}{\nu_2} = 4\%$$

Лишь столько кинетической энергии вращения двигателя, может быть использовано, при получении электрической энергии таким способом

Оценивать точность полученных результатов не имеет смысла, так как погрешность вычисления полученной теплоты явно больше 100%.